

様式 1

氏 名	長谷川 尊之
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	第 5244 号
学位授与年月日	平成 20 年 9 月 30 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当者
学 位 論 文 名	GaAs/AlGaAs 超格子におけるワニエ・シュタルク局在状態形成と ブロッホ振動ダイナミクスに関する分光学的研究
論文審査委員	主 査 教授 中山正昭 副主査 教授 細田誠 副主査 教授 寺井章

論 文 内 容 の 要 旨

半導体超格子において、電場印加による包絡波動関数のワニエ・シュタルク (WS) 局在現象は、波動関数の局在性の制御、および、サブバンドエネルギーの制御 (eFD のエネルギー間隔で量子化: F は電場強度、 D は超格子周期) を可能とし、超格子の多様な光機能性を発現する。また、WS 局在状態の超高速コヒーレント現象は、重ね合わせ波束のブロッホ振動として知られており、電場強度で振動数可変 ($\nu_{\text{BO}}=eFD/h$) なテラヘルツ (THz) 領域振動数の電磁波を発生することから、物性および THz テクノロジーへの応用の両面から盛んに研究が行われている。本論文は、 $p-i-n$ 構造に埋め込まれた GaAs/AlGaAs 超格子を試料とし、WS 局在状態の形成過程および共鳴結合現象、ならびに、ミニバンドから WS 局在状態への移行過程におけるブロッホ振動ダイナミクスに関する分光学的研究の成果をまとめたものである。

第 1 章では、まず本研究の背景について述べ、続いて、ミニバンド構造、WS 局在状態、ブロッホ振動について概説した。最後に本研究の目的と本論文の構成について述べた。

第 2 章では、GaAs (6.8 nm)/AlAs (0.9 nm) 超格子を試料とし、ミニバンドから WS 局在状態への移行過程について述べた。本研究では、ミニバンドおよび WS 局在条件での光学遷移に対して極めて高感度な電場変調反射分光により、第 1 と第 2 ミニバンドの WS 局在状態への移行過程を同時に観測することに成功した。実験結果は、伝達行列法を用いた固有状態の理論計算結果に基づいて詳細に解析した。その結果、第 1 と第 2 ミニバンドにおいて、WS 局在状態を形成する臨界電場が統一的に電子と正孔のミニバンド幅の和に比例するという実証した。

第 3 章では、GaAs (6.8 nm)/Al_{0.1}Ga_{0.9}As (4.0 nm) 超格子を試料とし、WS 局在状態間の共鳴結合条件での光電流双安定性について述べた。本研究では、電場変調反射分光法により共鳴結合現象を検出した。共鳴結合条件において、光電流-電圧特性に負性微分抵抗特性が現れることを利用し、自己電気光学効果素子における、光電流の双安定性動作を実現した。

第 4 章では、GaAs (6.8 nm)/AlAs (0.9 nm) 超格子を試料とし、ミニバンドから WS 局在状態への移行過程におけるブロッホ振動ダイナミクスについて述べた。本研究では、超短パルスレーザー (パルス幅: 70 fs) を用いた時間分解反射型ポンプ-プローブ信号の印加電圧 (電場強度) 依存性の系統的な結果から、ミニバンド励起子の量子ビートからブロッホ振動へのコヒーレントダイナミクスの移行過程を明確に観測した。更には、ミニバンド励起子量子ビートが消滅した (ミニバンド破綻) 直後の電場領域において、包絡波動関数の弱局在性を反映し、通常のブロッホ振動の 2 倍の振動数 ($\nu_{2\text{BO}}=2eFD/h$) を有する特異なブロッホ振動が生じることを見出した。

最後に、第 5 章では、本研究で得られた成果を総括して結論とした。

論文審査の結果の要旨

半導体超格子とは、ナノメートルオーダーの半導体超薄膜の周期的ヘテロ接合構造であり、電子・正孔波動関数に対する量子効果が顕著に発現するために、従来のバルク結晶とは異なる新たな物性と機能が期待されている物質系である。半導体超格子では、量子井戸間の共鳴トンネル効果によってミニバンドが形成される。そのミニバンド状態に積層方向の電場を印加することにより、共鳴トンネル条件が破綻し、電子・正孔波動関数が局在化する。この現象をワニエ・シュタルク（WS）局在と呼び、電場（バイアス電圧）による超格子電子状態の制御という大きな物理的意義を有している。また、ブロッホ振動は、WS 局在状態における電子・正孔波束の動的過程であり、テラヘルツ振動数領域の超高速コヒーレント現象として注目を集めている。本論文は、分子線エピタキシー法により結晶成長された GaAs/AlGaAs 超格子を対象として、ワニエ・シュタルク局在状態形成とブロッホ振動ダイナミクスに関する分光学的研究の成果をまとめたものである。

まず、ワニエ・シュタルク局在状態形成に関して、極めて高感度に光学遷移を検出できる電場変調反射分光法を駆使して、GaAs(6.8nm)/AlAs(0.9nm)超格子の第 1 量子状態と第 2 量子状態のミニバンドが WS 局在状態へ移行する過程を明らかにしている。また、理論的には、伝達行列法を用いて超格子の電子・正孔固有状態の電場強度依存性の計算を行い、実験結果を解析している。従来の研究では、第 1 量子状態ミニバンドのみが研究対象であったが、本研究では、第 1 量子状態と第 2 量子状態のミニバンドが WS 局在状態へ移行する臨界電場が、ユニバーサルにミニバンド幅によって決定されることを解明している。

次に、GaAs(6.8nm)/Al_{0.1}Ga_{0.9}As(4.0nm)超格子を対象として、空間的に離れている WS 局在状態間の波動関数共鳴結合条件において、光電流－電圧特性に負性微分抵抗が生じることを見出している。この負性微分抵抗特性を利用して、自己電気光学素子における光電流双安定性動作を実現している。

最後に、GaAs(6.8nm)/AlAs(0.9nm)超格子を対象として、フェムト秒パルスレーザーを光源とした時間分解反射型ポンプ・プローブ分光法により、ブロッホ振動を観測している。従来、ブロッホ振動数は eFD/h (F は電場強度、 D は超格子周期) であることが常識であった。本研究では、第 1 量子状態ミニバンドが WS 局在状態に移行する電場強度領域において、波動関数の弱局在性を反映して、 $2eFD/h$ の振動数を有する新規なブロッホ振動が生じることを見出している。また、局在性が大きい高電場領域では、従来のブロッホ振動に移行することを確認している。加えて、ブロッホ振動の電場強度依存性を理論的に解析している。

以上のように本論文は、ナノ構造半導体材料として注目されている半導体超格子の WS 局在状態とブロッホ振動に関して、斬新かつ重要な知見を提示している。その成果は、光物性工学分野の発展と半導体超格子をベースとした光機能性素子の開拓に寄与するところが大きい。よって、本論文の著者は、博士（工学）の学位を受ける資格を有するものと認める。